

## Pengaturan Berat Total Material Yang Keluar Dari *Weight Feeder Conveyor* Dengan Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy

Fendy Santoso, Thiang

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra  
e-mail: fendy@petra.ac.id; thiang@petra.ac.id

### Abstrak

Makalah ini menjelaskan tentang aplikasi kontrol logika fuzzy untuk mengatur plant *weight feeder conveyor* yang telah dimodelkan dalam bentuk fungsi alih orde tiga. Sistem kontrol logika fuzzy yang telah didisain mempunyai satu input yaitu error dan satu output yaitu kecepatan motor yang diwakili dengan tegangan motor. Sistem telah diuji dengan simulasi pada komputer dengan menggunakan Matlab. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa sistem kontrol logika fuzzy dapat bekerja dengan baik. Rise time dan settling time terkecil yang dapat dicapai adalah 4 dan 6 detik.

**Kata kunci** : kontrol logika fuzzy, weight feeder, simulink-Matlab.

### Abstract

*This paper describes about a fuzzy logic control's application on weight feeder conveyor. The plant represented by a third order transfer function. The designed fuzzy logic control had single input and single output. The crisp input of fuzzy logic control was an error signal and the crisp output was a speed of motor. The system was tested by a computer simulation using Matlab. Experiment results showed that fuzzy logic control could work well. The best rise time and settling time achieved by the system were 4 and 6 seconds respectively.*

**Keywords** : fuzzy logic control, weight feeder, Matlab-simulink.

### Pendahuluan

Dalam industri, *weight feeder* memegang peranan yang penting dalam menentukan kualitas produk yang dihasilkan. Pada prinsipnya *weight feeder* dapat dianggap sebagai suatu timbangan elektris-mekanis berbentuk *conveyor* yang secara otomatis menentukan berat material penyusun yang akan diumpangkan ke proses. Sebagai contoh pada bagian pengolahan bahan mentah dalam industri semen, *weight feeder* bertugas mencampur komponen penyusun semen seperti: batu kapur/*limestone*, pasir silica, pasir besi, dan tanah liat/*clay*, sebelum bahan-bahan itu diumpangkan ke *kiln dan preheater* untuk proses pemanasan lanjut. Sedangkan pada bagian *finish mill*, *weight feeder* bertugas mencampur material setengah jadi (*clinker*), tras, *gypsum*, sebelum material tersebut digiling di *finish mill (tube mill)*.

Karenanya maka kesalahan (ketidakakuratan) kerja *weight feeder* dapat mengakibatkan mutu produk yang dihasilkan kurang baik, atau rusak. Sebaliknya respon *weight feeder* yang akurat akan menghasilkan suatu komposisi bahan baku

penyusun produk yang mendekati desain yang diinginkan, sehingga akan dihasilkan produk yang berkualitas baik pula. Oleh karena itu dalam makalah ini dibahas tentang perancangan sistem kontrol untuk mengatur berat kumulatif material yang keluar dari *conveyor*. Metode kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol logika fuzzy.

Penulisan makalah ini dimulai dengan pembahasan model matematika sistem *weight feeder*. Pada bagian ini dibahas model matematika sistem *weight feeder* dengan pendekatan fungsi alih (*transfer function*). Pembahasan dilanjutkan dengan menjelaskan perancangan sistem kontrol logika fuzzy. Pada bagian selanjutnya dibahas mengenai pengujian dan simulasi sistem dengan menggunakan *Fuzzy logic toolbox* dan Simulink dari Matlab. Makalah ini diakhiri dengan kesimpulan dari hasil perancangan sistem.

### Model Matematika Sistem Weight Feeder

Pemodelan (*modeling*) berarti menyatakan sistem dalam dunia nyata (*real world*) menjadi bentuk persamaan matematika. Modelling juga dapat diartikan sebagai usaha menirukan kelakuan proses "*real world system*" dalam usaha untuk memahaminya. Hal tersebut dilakukan dengan

**Catatan**: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 3, nomor 2, September 2003.

menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya dengan menggunakan hukum-hukum ilmu alam (fisika dan/atau kimia). Pendekatan matematis yang digunakan untuk membuat model sistem weight feeder adalah pendekatan fungsi alih.

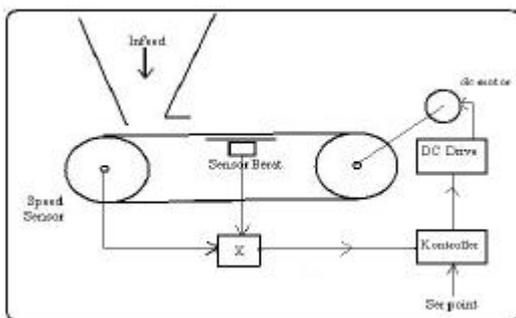
**1. Pendekatan Fungsi Alih (Transfer Function)**

Fungsi alih sistem didefinisikan sebagai perbandingan transformasi Laplace keluaran terhadap transformasi Laplace masukan, dengan semua syarat awal nol. Fungsi alih sistem juga merupakan model matematika yang menghubungkan variabel masukan dengan variabel keluaran, namun ia sendiri tidak memberikan informasi mengenai struktur fisik sistem tersebut. [1]

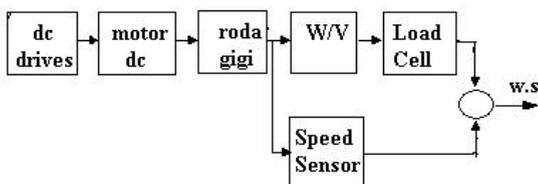
Konsep fungsi alih terbatas pada sistem linier, parameter sistem tidak berubah terhadap waktu (*time invariant*), sistem dengan satu masukan dan satu keluaran (single input-single output).

**2. Fungsi Alih Loop Terbuka**

Sistem Mekanik dan perangkat keras dari weight feeder dapat dilihat pada gambar 1. Sistem ini menggunakan sebuah motor dc untuk menggerakkan conveyor. Sensor berat yang digunakan yaitu load cell. Sensor kecepatan menggunakan encoder yang keluarannya berupa pulsa dengan frekuensi sebanding dengan kecepatan putar. Blok diagram model weight feeder dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 1: Sistem *weight feeder conveyor*



Gambar 2 Blok diagram model loop terbuka *weight feeder*

**3. Model Matematika Sensor Kecepatan (Speed Sensor)**

Sensor kecepatan pada *weight feeder*, berupa piranti elektronik yang menghasilkan frekuensi pulsa keluaran sebanding dengan besar kecepatan sudut poros motor. Secara umum model matematika sensor kecepatan dapat didekati dengan model sistem orde satu sebagai berikut:

$$\frac{K_s}{t_s s + 1} \tag{1}$$

Tetapi karena respon dinamik sensor jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, maka konstanta waktu (*time constant*) dan *death time* pada sensor dapat diabaikan. Sehingga fungsi alih sensor dapat didekati dengan penguatan (*gain*) saja.

Besarnya gain sensor kecepatan  $K_s(s) = 1$ .

**4. Model Matematika Sensor Berat (load cell)**

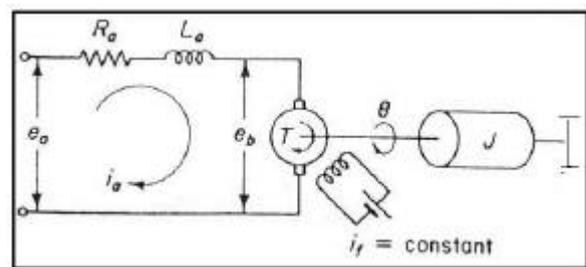
Sensor berat diletakkan tepat ditengah-tengah *belt conveyor*. Model matematika sensor berat dapat didekati dengan sistem orde satu. (seperti halnya sensor kecepatan). Seperti halnya sensor kecepatan, karena respon dinamik sensor jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, sehingga konstanta waktu (*time constant*) dan *death time* pada sensor dapat diabaikan, sehingga fungsi alih sensor dapat didekati dengan penguatan (*gain* saja) :

$$Gain = \frac{span\ output}{span\ input}$$

$$Gain = \frac{30mV}{90,72kg} = 0,331mv / kg \cdot$$

Diperoleh besarnya gain sensor berat:  $K_w(s) = 0,331\ mV/Kg$ .

**5. Model Matematika Motor DC Berpenguat Terpisah**



Gambar 3 Rangkaian motor dc berpenguat terpisah [1]

Besaran-Besaran Fisik Motor

- Ra = tahanan jangkar ( $\Omega$ )
- $k_b$  = konstanta EMF balik
- La = induktansi kumparan jangkar (H)
- Ia = arus kumparan jangkar (A)
- T<sub>M</sub> = torsi motor (N.m)
- T<sub>D</sub> = Torsi gangguan (N.m)
- If = arus medan (A)
- J = momen inersia ekivalen (kg-m<sup>2</sup>)
- Er = tegangan referensi masukan (Volt)
- K<sub>T</sub> = konstanta torsi
- f = koefisien gesek viskos (Nm/rad/sec)
- K<sub>t</sub> = konstanta tachometer (volt/rad/sec)

### Penurunan Model Matematika Motor dc

Tachometer dc memberikan tegangan keluaran  $e_t$  sebanding dengan kecepatan poros motor  $w$ . Tegangan ini dikurangkan dengan tegangan referensi input  $e_r$  menghasilkan signal error ( $e$ ). Sinyal ini sesudah dikuatkan digunakan untuk mengendalikan arus jangkar ia dari motor dc.

Tachometer dc merupakan generator dc konvensional dengan eksitasi magnet permanent. Tegangan keluaran loop terbuka diberikan oleh persamaan :

$$e_t = K_t \omega \quad (2)$$

$\phi$  dibuat konstan (eksitasi magnet permanent), sehingga tegangan keluaran berbanding langsung dengan dengan kecepatan sudut  $\omega$ . Persamaan diatas dapat ditulis kembali :

$$e_t = k_t \omega \quad (3)$$

dimana  $k_t$  (volt/rad/sec) disebut sebagai konstanta tachometer. Tegangan pada terminal jangkar motor diberikan oleh persamaan :

$$e_a = K_a e = K_a (e_r - e_t) \quad (4)$$

Pada loop jangkar berlaku Hukum Kirchoff Tegangan :

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_b \omega = e_a \quad (5)$$

dimana  $K_b$  merupakan konstanta emf balik dari motor. Medan konstan, fluks konstan dan torsi mempunyai arah sesuai kumparan magnet, sehingga,

$$T_M = K_T i_a \quad (6)$$

$K_T$  = konstanta torsi motor.

Arus Jangkar magnet menghasilkan torsi yang bekerja terhadap inersia dan gesekkan, sesuai persamaan :

$$T_D + J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = T_M = K_T i_a \quad (7)$$

Diasumsikan semua syarat awal adalah nol, kemudian diambil transformasi Laplace dari semua persamaan diatas:

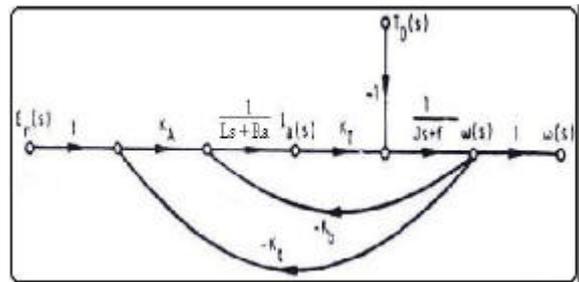
$$E_r(s) = K_t \omega(s)$$

$$E_a(s) = K_a [E_r(s) - E_t(s)]$$

$$L_a s I_a + R_a I_a(s) + K_b \omega(s) = E_a(s)$$

$$K_T I_a(s) = T_M(s) = [Js + f] \omega(s) + T_D(s)$$

$$T_m(s) - T_D(s) = [Js + f] \omega(s) \quad (8)$$



Gambar 4 Grafik aliran signal pada motor dc berpenguat terpisah [2]

Berdasarkan penurunan rumus diatas dengan mengasumsikan torsi gangguan sama dengan nol, diperoleh:

- Hanya ada satu lintasan maju:

$$P_1 = \frac{K_a K_T}{(Ls + R_a)(Js + f)} \quad (9)$$

- Ada dua loop umpan balik :

$$P_{11} = \frac{-K_T K_b}{(Ls + R_a)(Js + f)}$$

$$P_{21} = \frac{-K_a K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)} \quad (10)$$

- Tidak ada perkalian kombinasi dua, tiga, buah loop yang saling tidak menyentuh.

- Dengan menggunakan rumus Penguatan Masson (Masson Gain Formula):

$$T(s) = \frac{\omega(s)}{E_r(s)} = \frac{\sum P_n \Delta_n}{\Delta}$$

$$\Delta = 1 - \left[ \frac{K_T K_b}{(Ls + R_a)(Js + f)} - \frac{K_a K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)} \right]$$

$$= 1 + \frac{K_T K_b + K_a K_T K_t}{(Ls + R_a)(Js + f)}$$

Dengan melalui substitusi persamaan diatas, maka diperoleh rumus fungsi alih motor dc (tanpa pengabaian induktansi jangkar):

$$\begin{aligned}
 T(s) &= \frac{w(s)}{E_r(s)} = \frac{\sum P_1 \Delta_1}{\Delta} \\
 &= \frac{K_A K_T}{(Ls + R_a)(Js + f) + K_T K_b + K_A K_T K_i} \\
 &= \frac{K_A K_T}{LJ^2 s^2 + (Lf + R_a J)s + (R_a f + K_T K_b + K_A K_T K_i)} \\
 &= \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (11)
 \end{aligned}$$

Motor dc yang digunakan adalah motor dc berpenguatan terpisah dengan kontrol jangkar. Besarnya kecepatan diatur dengan mengubah-ubah besarnya tegangan jangkar.

Tabel 2 Data fisik motor dc

No	Besaran fisik	Harga	Sat.
01.	Daya	1,5	Hp
02.	Tahanan jangkar	5	Ohm
03.	Induktansi jangkar	3	Mh
04.	Konstanta torsi	$6 \cdot 10^{-5}$ *)	Nm/A
05.	Konstanta emf balik	$0.055$ *)	V/s.rad
06.	Momen Inersia	$5 \cdot 10^{-5}$ *)	Kg-m <sup>2</sup>
08.	Koefisien gesek	-	-

Pada akhirnya didapatkan rumus fungsi alih pada motor dc sbb:

$$T_M(s) = \frac{4000}{s^2 + 1167s + 4000} \quad (12)$$

### 6. Model Matematika DC drives

DC drives menggunakan SCR (*Silicon Cotrolled Rectifier*) yang berfungsi sebagai *actuator* kendali dan mengkonversi sinyal ac dari sumber menjadi sinyal dc untuk catu daya jangkar motor dc. Besarnya gain dc drives dapat dihitung sebagai berikut:

$$K_{SCR} = \frac{180}{220} = 0.82$$

$$t_{SCR} = 4ms \quad [3]$$

Model matematika dc drives dapat didekati dengan sistem orde satu, tetapi karena respon dinamik dc drives adalah jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, maka konstanta waktu (*time constant*) dan *death time* pada dc drives dapat diabaikan. Sehingga fungsi alih dc drives dapat didekati dengan penguatan (*gain*) saja.

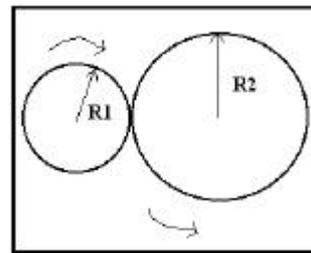
### 7. Model Matematika Roda Gigi

#### Hubungan Roda Gigi Yang Bersinggungan

Dalam selang waktu yang sama, panjang lintasan yang ditempuh kedua roda adalah sama, maka laju linier kedua roda juga sama, tetapi arah putarannya berlawanan.

$$\begin{aligned}
 v_1 &= v_2 \\
 \omega R_1 &= \omega_2 R_2 \quad (13)
 \end{aligned}$$

Kecepatan putar roda gigi berbanding terbalik dengan banyaknya gigi. Roda yang besar selalu memiliki gigi lebih banyak, sehingga kecepatan putarnya selalu lebih rendah.  $\frac{w_2}{w_1} = \frac{n_1}{n_2}$

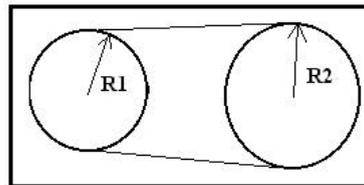


Gambar 5 Hubungan Roda - Roda Bersinggungan

#### Hubungan Roda-Roda yang Dihubungkan dengan Sabuk (Rantai)

Untuk roda-roda yang dihubungkan sabuk, laju liniernya sama.

$$\begin{aligned}
 v_1 &= v_2 \\
 \omega R_1 &= \omega_2 R_2 \quad (14)
 \end{aligned}$$

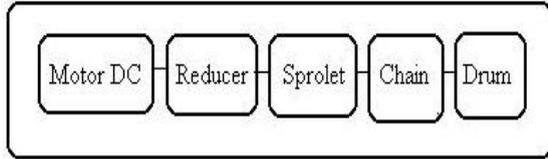


Gambar 6 Hubungan roda dengan sabuk (rantai)

Pada dasarnya *reducer* dan *sprolet* merupakan sistem transmisi daya, yang terdiri dari roda gigi dengan susunan tertentu, yang berfungsi mentransfer putaran dari poros motor dc menuju *belt conveyor*.

Tabel 4. Data reducer dan sprolet

No	Besaran fisik	Harga
01.	Rasio reducer	1/59
02.	Rasio sprolet	1/23
03.	Chain	1/70



Gambar 7. Sistem transmisi daya pada *weight feeder*

Sehingga pada akhirnya diperoleh besarnya gain untuk sistem transmisi sebagai berikut:

$$K_T(s) = \frac{1}{59} * \frac{23}{70} * 20 = 0,111$$

### 8. Hubungan Matematika Antara Berat Total Material Yang Keluar Dari Conveyor Dengan Kecepatan

Dengan asumsi perubahan laju linier *belt conveyor* sebanding dengan perubahan berat material yang jatuh terhadap perubahan waktu.

Secara matematis pernyataan diatas dapat didekati dengan model persamaan differensial sebagai berikut:

$$v(t) = k_1 \frac{dw(t)}{dt}$$

$$w(t) = K \int v(t).dt$$

$$w(s) = \frac{K_{wv}}{s} .v(s)$$

$$\frac{w(s)}{v(s)} = \frac{K_{wv}}{s} \quad (15)$$

W = berat material yang diumpankan ke proses.

v = kecepatan linier belt conveyor

Dari persamaan diatas terlihat bahwa bila berat material konstan, atau dengan kata lain  $dw/dt=0$ , berarti laju belt conveyor sama dengan nol. Sebaliknya bila nilai  $dw/dt$  ada berarti ada nilai laju belt conveyor (v).

Dari data hubungan antara berat dan kecepatan, maka dapat dihitung nilai penguatan  $K_{wv}$  sebagai

$$\text{berikut : } \frac{W(s)}{V(s)} = K_{wv} = 1.138$$

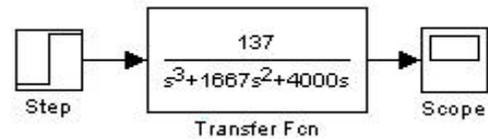
Sehingga hubungan berat dengan kecepatan dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$\frac{W(s)}{v(s)} = \frac{1,138}{s}$$

### 9. Model Matematika Sistem Conveyor Keseluruhan

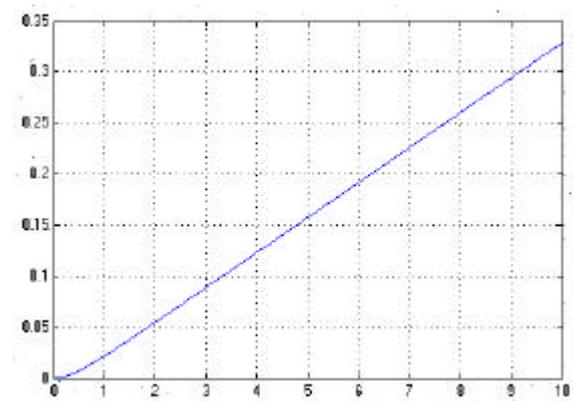
Setelah dilakukan perhitungan, diperoleh fungsi alih loop terbuka plant *weight feeder*, dengan besaran keluaran adalah berat kumulatif material yang dikeluarkan, dan variabel masukan adalah setting berat yang direpresentasikan dalam bentuk tegangan motor dapat diwakili dengan fungsi alih berikut:

$$T(s) = \frac{137}{s(s^2 + 1667s + 4000)} \quad (2)$$



Gambar 8. Rangkaian simulasi fungsi alih loop terbuka

Gambar 3 merupakan rangkaian simulasi fungsi alih loop terbuka dari plant *weight feeder* dalam simulink. Setelah dilakukan pemodelan terhadap plant (*weight feeder*), maka langkah selanjutnya adalah simulasi sistem. Sistem diberi input dengan sinyal uji step, kemudian diamati responnya. Respon yang dimaksud adalah tanggapan *transient* dan tanggapan pada kondisi *steady state*.



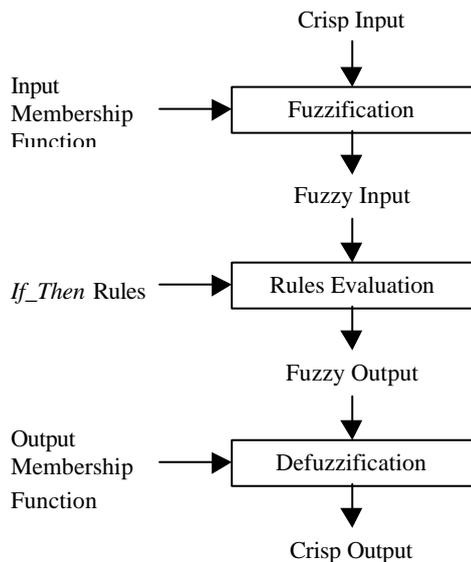
Gambar 9. Respon loop terbuka pada *weight feeder*

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi respon sistem. Dari gambar terlihat bahwa respon loop terbuka plant meningkat bersamaan dengan waktu. Hal tersebut terjadi karena pada plant mempunyai lokasi pole di titik asal, sehingga

plant bersifat sebagai integrator. Secara praktik hal tersebut ditandai dengan meningkatnya jumlah berat (material) kumulatif yang keluar dari *weight feeder* tiap saat selama motor berputar.

### Kontrol Logika Fuzzy

Proses logika fuzzy (fuzzy inference) terdiri atas tiga bagian utama. Bagian pertama adalah fuzzifikasi yang bertujuan mengubah crisp input menjadi fuzzy input dalam bentuk variabel fuzzy. Bagian kedua adalah rules evaluation yang bertujuan mengolah fuzzy input berdasarkan if-then rule untuk menentukan keputusan (fuzzy output). Bagian ketiga defuzzification yang bertujuan mengubah fuzzy output yang merupakan hasil rules evaluation menjadi crisp output. Gambar 5 menunjukkan blok diagram fuzzy inference.



Gambar 10. Blok Diagram Fuzzy Inference

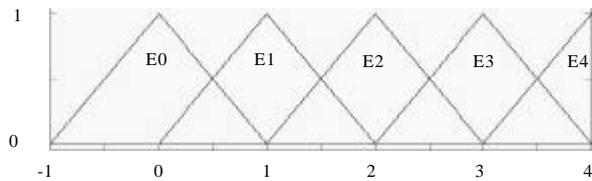
#### 1. Desain Kontrol Logika Fuzzy Untuk Weight Feeder

Crisp input dari system kontrol logika fuzzy untuk weight feeder adalah sinyal error antara setting point dengan output sensor berat. Nilai sinyal error tersebut direpresentasikan dengan persamaan berikut:

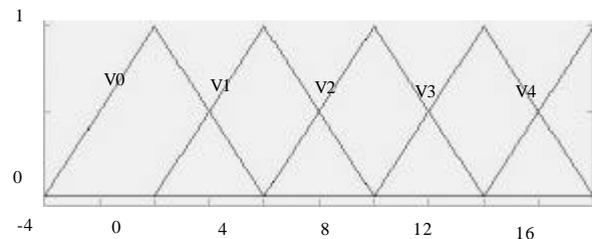
$$error = SP - PV$$

Crisp output dari system kontrol logika fuzzy yang telah didesain adalah kecepatan motor yang direpresentasikan dengan tegangan input driver motor.

Gambar 11 dan 12 menunjukkan desain awal membership function untuk crisp input sinyal error dan crisp output tegangan motor. Masing-masing membership function memiliki 5 label yaitu E0, E1, E2, E3, E4 untuk crisp input sinyal error dan V0, V1, V2, V3, V4 untuk crisp output tegangan motor. E0 sampai E4 menunjukkan besar sinyal error dimana sinyal error terbesar dinyatakan oleh label E4. V0 sampai V4 menyatakan besar tegangan motor yang sebanding dengan kecepatan motor. Tegangan terbesar dinyatakan oleh label V4.



Gambar 11. Membership Function untuk Input Sinyal Error



Gambar 12. Membership Function untuk Output Tegangan Motor

Sistem kontrol logika fuzzy yang telah didesain merupakan sistem satu input dan satu output. Oleh karena itu sistem ini hanya menggunakan sedikit rule. Rule diekstrak dari pengetahuan logika seorang operator bila mengoperasikan sistem ini secara manual. Berikut menunjukkan rule yang telah didesain untuk sistem weight feeder ini.

- IF Error is E0 THEN Tegangan is V0
- IF Error is E1 THEN Tegangan is V1
- IF Error is E2 THEN Tegangan is V2
- IF Error is E3 THEN Tegangan is V3
- IF Error is E4 THEN Tegangan is V4

Respon sistem yang diinginkan adalah respon sistem dengan jenis *critically damped*. Sistem kontrol logika fuzzy dirancang sedemikian rupa sehingga tidak terjadi overshoot pada respon sistem. Oleh karena itu, semesta pembicaraan dalam membership function untuk crisp input dan crisp output selalu positif.

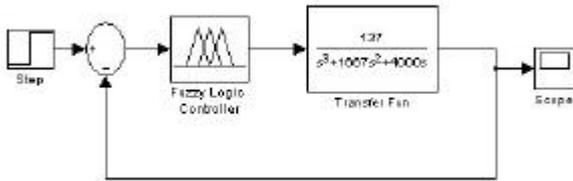
**Keterangan:**

$E_x$  = Sinyal kesalahan level ke-x ;  $x=0,1,2,3,4$

$V_x$  = Level tegangan motor ke-x ;  $x=0,1,2,3,4$

**Pengujian Sistem**

Pengujian sistem dilakukan secara simulasi software dengan menggunakan Matlab simulink dan fuzzy logic toolbox. Gambar 13 merupakan rangkaian simulasi sistem kontrol weight feeder dengan menggunakan kontrol logika fuzzy.



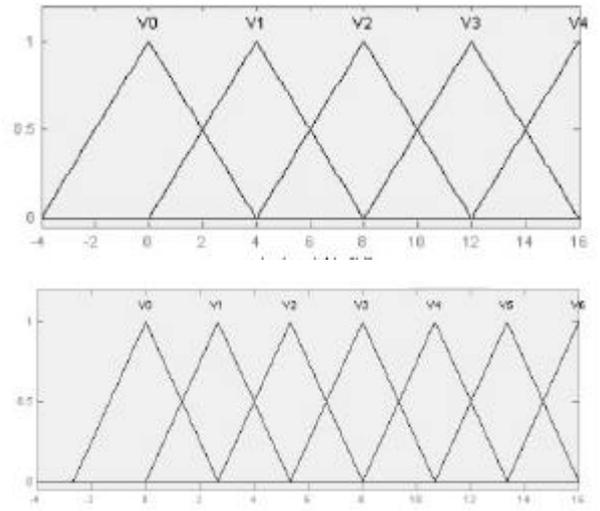
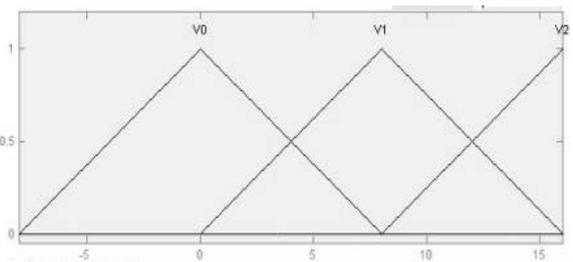
Gambar 13. Blok Diagram Simulasi Sistem Kontrol Weight Feeder

Beberapa metode pengujian sistem yang dilakukan adalah sebagai berikut:

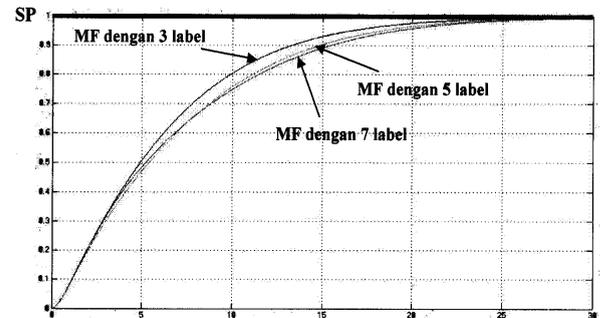
1. Pengujian sistem dengan variasi jumlah label/fuzzy set dalam membership function
2. Pengujian sistem dengan variasi bentuk fuzzy set
3. Pengujian sistem dengan variasi range semesta pembicaraan dalam membership function
4. Pengujian sistem dengan variasi perubahan setting point

**1. Pengujian sistem dengan variasi jumlah label/fuzzy set**

Pengujian ini menggunakan 3 variasi jumlah label yaitu 3, 5 dan 7 label untuk input dan output membership function. Pengujian ini tetap menggunakan membership function dengan bentuk segitiga dan tidak mengubah range semesta pembicaraan. Gambar 14 menunjukkan gambar membership function yang digunakan dan hasil pengujian sistem dapat dilihat pada gambar 15.



Gambar 14. Membership Function dengan 3, 5 dan 7 Label

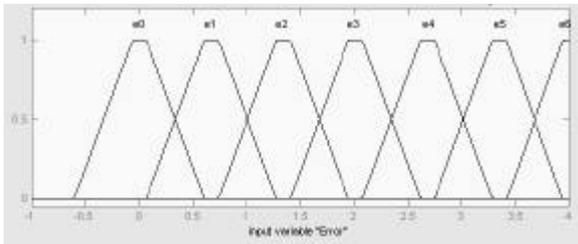
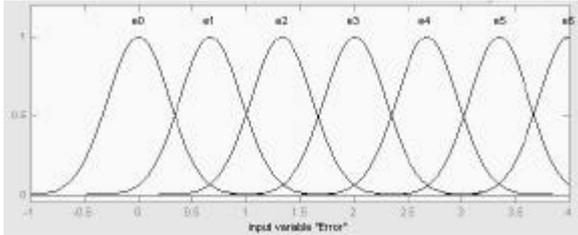


Gambar 15. Respon Sistem dengan Variasi Jumlah Label

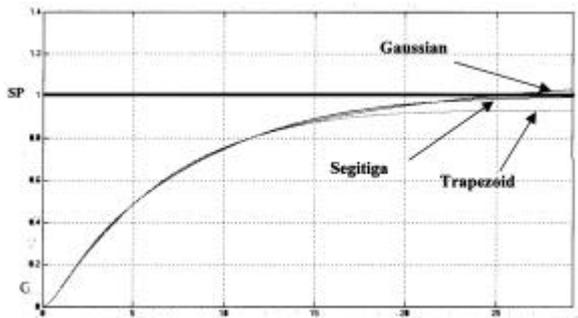
Dari hasil simulasi terlihat bahwa *membership function* dengan 3 label menghasilkan nilai *rise time* yang lebih kecil dibandingkan dengan *membership function* dengan 5 dan 7 label. Akan tetapi semua sistem menghasilkan nilai *settling time* yang sama. Sehingga *membership function* dengan 3 label menghasilkan luasan sinyal error yang lebih kecil dan respon yang lebih baik.

**2. Pengujian sistem dengan variasi bentuk fuzzy set**

Dalam pengujian ini digunakan 3 bentuk membership yaitu *gaussian*, segitiga dan trapesium dengan tidak mengubah jumlah label dan range semesta pembicaraan. Bentuk membership function trapesium dan gaussian yang digunakan dapat dilihat pada gambar 16 dan hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 17.



Gambar 16. Bentuk Membership Function Gaussian dan Trapesium

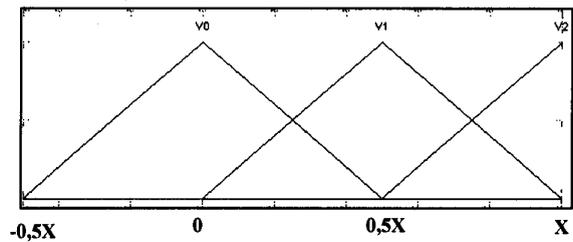


Gambar 17. Respon Sistem dengan Variasi Bentuk Membership Function

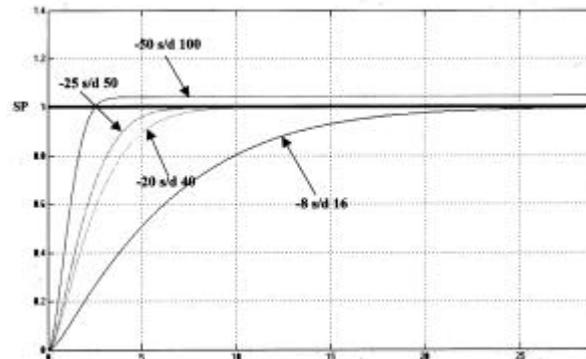
Dari ketiga variasi bentuk membership function, yang terbaik adalah bentuk segitiga. Ketiga bentuk menghasilkan *rise time* sama besar tetapi respon *steady state* berbeda. Bentuk *gaussian* menghasilkan *steady state error* negatif dan bentuk trapesium menghasilkan *steady state error* positif.

### 3. Pengujian sistem dengan variasi range semesta pembicaraan dalam membership function

Dari pengujian sebelumnya, selalu diperoleh respon sistem dengan *rise time* lebih besar dari 12 detik. Karena itu pengujian ini menggunakan variasi range semesta pembicaraan pada output membership function untuk memperbaiki *rise time* dari respon sistem. Bentuk membership function yang digunakan dapat dilihat pada gambar 18. Ada 4 range yang digunakan yaitu  $-8$  s/d  $16$  ( $x=16$ ),  $-20$  s/d  $40$  ( $x=40$ ),  $-25$  s/d  $50$  ( $X=50$ ) dan  $-50$  s/d  $100$  ( $x=100$ ). Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 19.



Gambar 18. Membership Function dengan Variasi Range Semesta Pembicaraan



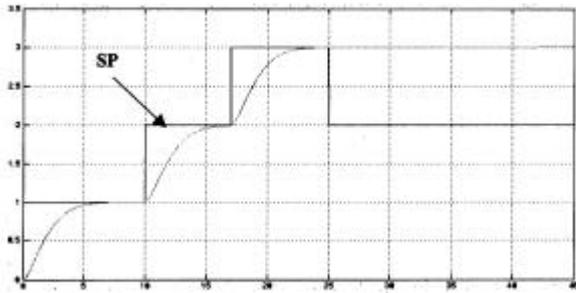
Gambar 19. Respon Sistem dengan Variasi Range Semesta Pembicaraan

Dari hasil simulasi diperoleh respon sistem terbaik saat range membership output  $-25$  s/d  $50$ . Semakin lebar range membership output maka respon sistem semakin cepat (*rise time* dan *settling time* semakin kecil) tetapi untuk range lebih besar dari  $50$  menghasilkan *steady state error*. *Rise time* dan *settling time* terkecil yang dapat dicapai oleh sistem ini adalah  $4$  dan  $6$  detik.

### 4. Pengujian sistem dengan variasi perubahan setting point

Pengujian ini bertujuan untuk melihat respon sistem terhadap variasi perubahan setting point. Setting point awal dalam pengujian ini adalah  $1$  kemudian diubah menjadi  $2$ ,  $3$  dan kembali  $2$ .

Gambar 20 menunjukkan respon sistem dengan variasi perubahan nilai setting point. Dari hasil simulasi terlihat bahwa respon sistem dapat mengikuti perubahan setting point yang makin membesar, tapi tidak dapat mengikuti perubahan setting point yang mengecil. Hal ini terjadi karena dalam plant, tidak ada mekanisme sistem untuk mengurangi berat material. Respon sistem masih dapat mengikuti perubahan setting point selama perubahan setting point tersebut tidak lebih kecil dari  $6$  detik.



Gambar 20. Respon Sistem dengan Variasi Perubahan Setting Point

## Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa sistem kontrol logika fuzzy yang telah didisain dapat bekerja dengan baik. Dalam sistem ini, bentuk membership function yang menghasilkan respon terbaik adalah segitiga dengan 3 label dan range semesta pembicaraan  $-25$  s/d  $50$ . Rise time dan settling time terkecil yang dapat dicapai adalah 4 dan 6 detik. Hal ini berarti bahwa sistem dapat mengikuti perubahan setting point selama perubahan setting point tidak kurang dari 6 detik.

## Daftar Pustaka

- [1]. Ogata K., Modern Control Engineering, Prentice Hall International, Inc, 1996
- [2]. Gopal M., Control System Engineering, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1982.
- [3]. Houpis D'Azzo, Linier Control Systems Analysis and Design, 1986
- [4]. Ogata K., Solving Control Engineering Problems with MATLAB, Prentice Hall International, Inc, 1994
- [5]. Shahian Bahram, Hassul Michael., Control Sistem Design Using Matlab. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993
- [6]. Shearer, J. Lowen, Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems, Macmillan Publishing Company, New York, 1990
- [7]. Klir, George J and Yuan Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logics: Theory and Applications. New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1995.
- [8]. Terano, Toshiro. Fuzzy System Theory and It's Applications. London, Academic Press, Inc., 1992.
- [9]. Terano, Toshiro. Applied Fuzzy Systems. London, Academic Press Inc., 1994.